PCT WELTORGANISATION FÜR GEISTIGES EIGENTUM
Internationales Büro

INTERNATIONALE ANMELDUNG VERÖFFENTLICHT NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT)

(51) Internationale Patentklassifikation 6 : G02F 1/35, H01S 3/098 — A1

(11) Internationale Veröffentlichungsnummer: WO 96/36906

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum: 21. November 1996 (21.11.96)

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/CH96/00185

(22) Internationales Anmeldedatum: 15. Mai 1996 (15.05.96)

(30) Prioritätsdaten:
1499/95-9 19. Mai 1995 (19.05.95) CH

(71)(72) Anmelder und Erfinder: KELLER-WEINGARTEN, Ursula [CH/CH]; Rebbergstrasse 55, CH-8049 Zürich (CH).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: KOPF, Daniel [AT/CH]; St. Moritzstrasse 9, CH-8006 Zürich (CH).

(74) Anwalt: KELLER & PARTNER PATENTANWÄLTE AG; Marktgasse 31, Postfach, CH-3000 Bern 7 (CH).

(81) Bestimmungsstaaten: JP, US, europäisches Patent (AT, BE, CH, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE).

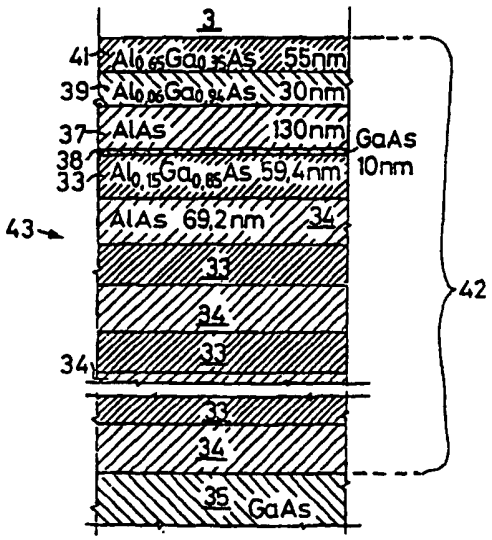
Veröffentlicht
Mit internationalem Recherchenbericht.

(54) Title: OPTICAL COMPONENT FOR GENERATING PULSED LASER RADIATION

(54) Bezeichnung: OPTISCHE KOMPONENTE ZUR ERZEUGUNG GEPULSTER LASERSTRAHLUNG

(57) Abstract

The optical component (43), preferably for use inside a laser resonator for generating pulsed laser radiation, especially mode-coupled radiation in the microsecond to femtosecond range, has a multi-layer, phase-couple, etalonless coating system (42) with at least one saturatably absorben layer (39), acting as a saturatable absorber. The layer sequence (33, 34, 37, 38, 39, 41) of the coating system can be structured in such a way that a negative group velocity dispersion is additionally produced for impinging resonator radiation. In the optical component acting and usable as a saturatable absorber, separated individual, discrete optical elements long known are no longer assembled in a sandwich-style with some minimisation, but a coating assembly is provided in which each individual layer contributes with the rest of the assembly to a phased overall behaviour for the impinging radiation. It is only through this formalism in design and consequently calculation that it is possible to place one or more layers having the saturatably absorbent properties in this assembly in such a way, taking account, of course, of the phase relationships, that an optimum absorbent effect that is to say up to saturation, can be obtained.



(57) Zusammenfassung

Die optische Komponente (43) zur bevorzugten Verwendung innerhalb eines Laserresonators für die Erzeugung gepulster Laserstrahlung, insbesondere von modengekoppelter Strahlung im Mikro-bis Femtosekunden-Bereich, hat ein als sättigbarer Absorber wirkendes mehrschichtig phasengekoppeltes, "etalonfreies" Beschichtungsensemble (42) mit wenigstens einer sättigbar absorbierenden Schicht (39). Die Schichtenfolgen (33, 34, 37, 38, 39, 41) des Beschichtungsensembles kann nun derart ausgebildet sein, dass sich für eine einfallende Resonatorstrahlung zusätzlich eine negative Dispersion der Gruppengeschwindigkeit ergibt. Bei der als sättigbarer Absorber wirkenden und verwendbaren, optischen Komponente werden nun nicht mehr separate einzelne, diskrete optische Elemente, wie sie bereits seit langem bekannt sind, sandwichartig unter einer Minimierung zusammengebaut, sondern es wird ein Beschichtungsensemble geschaffen, bei dem jede einzelne Schicht zusammen mit den restlichen des Ensembles zu einem phasenmässigen Gesamtverhalten für die einfallende Strahlung beiträgt. Nur durch diesen Ausgestaltungs- und dem sich daraus ergebenden Berechungsformalismus ist es möglich, eine oder mehrere Schichten, welche die sättigbar absorbierenden Eigenschaften aufweisen, derart in diesem Ensemble natürlich unter Beachtung der phasenmässigen Beziehungen zu plazieren, dass eine optimale, hier eine sättigbar absorbierende Wirkung erreichbar ist.

OPTISCHE KOMPONENTE ZUR ERZEUGUNG GEPULSTER LASERSTRAHLUNG

Die Erfindung betrifft eine optische Komponente zur bevorzugten Verwendung in einer Laseranordnung zur Erzeugung gepulster Laserstrahlung, insbesondere von gepulster Strahlung im Mikro- bis Femtosekundenbereich sowie zur Verwendung in einem optischen Aufbau eines gepulsten Lasers gemäß der Patentansprüche 10 und 11.

Kurze Pulse im Mikro- bis Femtosekundenbereich lassen sich durch Modenkopplung, Güteschaltung oder modengekoppelte Güteschaltung innerhalb eines Laserresonators erzeugen, was mit einem in den Laserresonator eingebrachten sättigbaren Absorber erfolgen kann. Als sättigbare Absorber werden Farbstoffe oder Halbleiter verwendet, deren Absorptionsvermögen mit zunehmender Einstrahlungsintensität sinkt. Auf diese Weise erfolgt eine Kopplung der unterschiedlichen Resonatormoden zu im Resonator pendelnden kurzen Pulsen, wie z. B. auf anschauliche Art und Weise in H. Weber/ G. Herziger, Laser - Grundlagen und Anwendungen, Physik Verlag GmbH, Weinheim/Bergstr. 1972, S. 144 ff. beschrieben ist.

Sättigbare Absorber konnten nun, wie in U. Keller, "Revo-

lution in der Erzeugung ultrakurzer Pulse", TR Transfer Nr. 23, 1994, S. 22 - 24 beschrieben ist, z. B. als sog. "Antiresonant Fabry-Perot Saturable Absorber" ausgebildet werden. Bei diesen bekannten sättigbaren Absorbern wurde ein Halbleiterabsorber verwendet, der in ein etwa 400 µm dickes Fabry-Perot-Interferometer mit Sandwichaufbau integriert war. Dieser Sandwich-Aufbau hatte analog zu einen Fabry-Perot (Etalon) zwei Spiegelelemente. Der Zwischenraum zwischen den beiden Spiegelelementen war mit dem sättigbar absorbierenden Halbleitermaterial ausgefüllt. Der Abstand der beiden Spiegelelemente wurde nun derart gewählt, daß die Strahlungsintensität im Inneren des Fabry-Perots stets viel kleiner war als die einfallende Intensität. D. h. das Fabry-Perot wurde in Antiresonanz betrieben. Dieser Sanwich-Aufbau ist u. a. in der EP-A 0 609 015 (US-A 5,345,454) und der EP-A 0 541 304 (US-A 5,237,577) beschrieben.

Ein weiterer sandwichartiger Aufbau eines sättigbaren Absorbers ist aus L.R. Brovelli et al., "Self-starting soliton modelocked Ti-sapphire laser using a thin saturable absorber, Electronics Letters, Vol. 31, No. 4, 1995, S. 287 - 288 bekannt. Bei dem hier beschriebenen "Sandwich-Absorber" (siehe rechte Spalte S. 287, zweit oberster Absatz) wird lediglich einer der beiden Fabry-Perot-Spiegel durch eine Antireflexionsbeschichtung, d. h. eine Antireflexionsvergütung ersetzt das sättigbar absorbierende Material befindet sich hier zwischen den beiden Deckelementen des Sandwichs.

Bei der erfindungsgemäßen u. a. als sättigbarer Absorber wirkenden und verwendbaren, optischen Komponente werden nun nicht mehr separate einzelne, diskrete optische Elemente, wie sie bereits seit langen bekannt sind, sandwichartig unter einer Minimierung zusammengebaut, sondern es wird ein "etalonfreies" Beschichtungsensemble geschaffen, bei dem jede einzelne Schicht zusammen mit den restlichen des Ensembles zu einem phasenmäßigen Gesamtverhalten für die einfallende Strahlung beiträgt. Unter einem etalonfreien Beschichtungsensemble wird eine Beschichtung verstanden, welche kein örtlich

bestimmbares Etalon aufweist. Nur durch diesen Ausgestaltungs- und dem sich daraus ergebenden Berechungsformalismus, ist es möglich, eine oder mehrere Schichten, welche die sättigbar absorbierende Eigenschaften aufweisen, derart in diesem Ensemble natürlich unter Beachtung der phasenmäßigen Beziehungen zu plazieren, daß eine optimale, hier eine sättigbar absorbierende Wirkung erreichbar ist.

In der Erfindung wird eine Beschichtung verwendet, deren gesamtes Verhalten sich nicht mehr lediglich als Addition der Eigenschaften der einzelnen Teilschichten ergibt. Es ist zuerst das gesamte Beschichtungsensemble zu komponieren. Erst nach dessen Vorliegen kann die Eigenschaft des Ensembles (rechnerisch analog einer Filterberechnung) bestimmt werden.

Die Erfindung verwendet ein Beschichtungsensemble aus einer Schichtenvielzahl, wobei sich hier infolge nur einer Entfernung oder einer Abänderung bereits einer einzigen Schicht das gesamte Schichtverhalten ändern kann. Im Gegensatz zum obigen Sandwich-Aufbau erfolgt hier eine matrixartige Verkopplung der gesamten Schichten miteinander, wie z. B. aus den theoretischen Ausführungen in M. Born und E. Wolf, Principles of Optics, Pergamon Press, 1975, S. 55 - 70 ersichtlich ist. Die Veränderung der physikalischen Daten einer Schicht (Ort im Ensemble, Brechungsindex, optische Schichtdicke) wirkt sich auf die Eigenschaften der Gesamtschicht aus.

Gegenüber dem bekannten sandwichartigen Aufbau können nun bei der Erfindung den optischen Komponenten durch die geeignete Bestimmung des Beschichtungsensembles Eigenschaften gegeben werden, wie sie nun gerade für einen optimalen Resonator benötigt werden. Durch die Wahl der optischen Schichtdicken und/oder dem Schichtmaterial sowie den Orten im Ensemble sind dessen Eigenschaften gezielt, wunschgemäß und somit optimal einstellbar. Es können nicht nur optische Eigenschaften berücksichtigt werden; es können auch u. a. Anforderungen an die Schichtresistenz, den genauen frequenzmäßigen Refle-

xionsverlauf sowie insbesondere, wie auch unten ausgeführt ist, der optimale Ort des Absorbermaterials und damit dessen optimale Wirkung ausgewählt werden.

Da sich bei der Ausführung des Beschichtungsensembles gegenüber den bekannten Sandwich-Aufbau eine geringe Anzahl von Schichten ergibt, kann diese Beschichtung nicht nur preisgünstiger, sondern unter Ausnützung größerer Toleranzen bei den zu verwendenden optischen Schichtdicken und deren Brechungsindizes hergestellt werden. Als besonders vorteilhaft hat sich die ausgezeichnete "Designfreiheit", welche eine Vielzahl von Kombinationsmöglichkeiten im Schichtenaufbau und dessen Materialien zuläßt, erwiesen.

Im folgenden werden Beispiele der erfindungsgemäßen optischen Komponente sowie deren bevorzugter Einsatz anhand der Zeichnungen näher beschrieben. Weitere Vorteile der Erfindung ergeben sich aus dem nachfolgenden Beschreibungstext. Es zeigen:

Fig. 1 einen Schnitt in Richtung der Flächennormalen durch ein beispielsweise als sättigbarer Absorber wirkendes Beschichtungsensemble,

Fig. 2 eine schematische Darstellung von Wellenwiderständen eines beliebigen Beschichtungsensembles zur Darstellung eines Berechnungsvorgangs für dessen Gesamtreflexion,

Fig. 3 der Reflexionsverlauf des in Figur 1 dargestellten Beschichtungsensembles bei senkrechtem Strahlungseinfall für Strahlung mit einer Wellenlänge im freien Raum zwischen 0,6 und 1,0 µm, wobei die absorbierende Schicht bei gleicher Gesamtensembledicke 20 nm näher an der Oberfläche und einmal 20 nm gegenüber einer Normallage weiter von dieser entfernt liegt,

Fig. 4 den normierten Intensitätsverlauf innerhalb des Be-

schichtungsensembles [die Lage der einzelnen dielektrischen Schichten ist gemäß Figur 1 eingezeichnet] für Wellenlängen von 810 nm, 820 nm, 830 nm und 850 nm (freier Raum), wobei die ausgezogene Kurve die Wellenlänge der Mittelfrequenz von 830 nm des modengekoppelten Laser in einer in Figur 5 dargestellten Anordnung zeigt,

Fig. 5 eine Darstellung eines optischen Aufbaus eines gepulsten Lasers,

Fig. 6 eine Variante zu einem in Figur 1 dargestellten Beschichtungsensemble, mit dem neben einer sättigbaren Absorption eine negative Gruppengeschwindigkeitsdispersion erreichbar ist,

Fig. 7 eine Darstellung eines optischen Aufbaus eines modengekoppelten Lasers mit der in Figur 6 dargestellten Komponente als Resonatorspiegel,

Fig. 8a bis 8e unterschiedlich aufgebaute Beschichtungsensembles, wobei jeweils der Figurenteil α den Intensitätsverlauf (I) in beliebigen Einheiten über der Dicke (z in μm) des gesamten Ensemble, der Figurenteil ß den Intensitätsverlauf über einen Ausschnitt aus dem Beschichtungsensemble und der Figurenteil Γ die Reflexion des Beschichtungsensembles über der auf der Abszisse angegebenen Wellenlänge in Mikrometern [μm],

Fig. 9 ein Beschichtungsensemble analog Figur 1, welches jedoch eine metallische Schicht hat,

Fig. 10 Schichten mit III-V-Halbleitermaterial und Fluoriden, was hier einen Spiegel bei einer Mittenwellenlänge von 1,4 μm ergibt,

Fig. 11 eine Variante eines Laserresonators, bei dem aktives

Medium und Resonatorendspiegel ein einziges Bauteil bilden,

Fig. 12 eine weitere Variante eines Laserresonators, bei dem das aktive Medium im Resonator als Umlenkspiegel ausgebildet ist, sowie

Fig. 13 eine weitere Variante mit einem miniaturisierten Laserresonators.

Figur 1 zeigt in einem Schnitt durch den Schichtenaufbau eines Beschichtungsensembles 1, welches als Reflektor und gleichzeitig als sättigbarer Absorber wirkt. Da als sättigbar absorbierendes Material hier beispielsweise ein Halbleiter, nämlich Galliumarsenid verwendet wird, sind auch für die restlichen Schichten dem Galliumarsenid im Strukturaufbau verwandte Halbleitermaterialien verwendet worden, um ein einwandfreies Aufwachsen während des Beschichtungsvorgangs (low-temperature MBE-grown bei ca. 400°C) zu erhalten.

In der Regel läßt man GaAs- und AlGaAs-Schichten enthaltende Struktur bei normalen MBE-Temperaturen von ca. 600°C aufwachsen. Bevorzugt läßt man jedoch die den sättbaren Absorber enthaltende Schicht bei tieferen Temperaturen, d. h. Zwischen 200°C und 600°C aufwachsen. Hierdurch können nämlich die Rekombinationszeiten der durch den Laserpuls erzeugten Ladungsträger beeinflußt werden und liegen dann einstellbar zwischen einigen 100 fs und einigen Nanosekungen. Diese Rekombinationszeit wird den geforderten Eigenschaften des Lasers angepaßt, wie z. B. in L.R. Brovelli et al., "Design and operation of antiresonant Fabry-Perot saturable semiconductor absorbers for mode-locked solid-state lasers", Journal of the Optical Society of America B, Vol. 12, 1995, Seite 311 - 322 ausgeführt ist. D. h. in den hier beispielsweise beschriebenen Beschichtungsensembles 1 und 42 sind lediglich die unten erwähnten Schichten 6 und 39 bei einer Temperatur von 400°C aufgewachsen.

Ausgehend von der Beschichtungsoberfläche (Grenzschicht zu Luft 3) weist das Beschichtungsensemble 1 eine 5 nm dicke Galliumarsenidschicht-Deckschicht 4 (GaAs), dann eine 40 nm dicke Aluminiumarsenidschicht 5 (AlAs), eine 20 nm dicke Galliumarsenidschicht 6 (GaAs) als sättigbar absorbierend wirkendes Material, eine 70 nm dicke Aluminiumarsenidschicht 7, eine 10 nm dicke Galliumarsenidschicht 9 und dann bevorzugt 25 Doppelschichten bestehend aus einer 59,4 nm dicken mit Aluminium dotierten Galliumarsenid-schicht 11 ($Al_{15\%}Ga_{85\%}As$) und einer 69,2 nm dicken Aluminiumarsenidschicht 13 auf. Das ganze Beschichtungsensemble 1 ist auf ein Galliumarsenidsubstrat 15 aufgebracht.

Die Berechnung der Reflexion des Beschichtungsensembles 1 erfolgt in Analogie an die Theorie der Anpassung an elektrische Wellenwiderstände nach Hermann A. Haus, Waves and Fields in Optoelectronics, 1984, Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 07632, ISBN 0-13-946053-5, Seite 31 - 46 unter Verwendung der in Figur 2 verwendeten Symbole.

Der Wellenwiderstand einer Schicht Z_x ist der Wellenwiderstand Z_0 des leeren Raumes (annähernd der von Luft) dividiert durch den Brechungsindex (Quadratwurzel aus der relativen Dielektrizitätskonstanten bei einer relativen magnetischen Permeabiltät von 1, was hier in der Regel gegeben ist). Der Wellenwiderstand Z_0 des leeren Raumes ist etwa 376,7 Ω.

Aus der elektrischen Wellentheorie ergibt sich dann für die Transformation der Wellenwiderstände

$$Z' = Z_n[Z_S/Z_n + j \tan(2\pi d_n/w_n)] / [1 + j(Z_S/Z_n)\cdot\tan(2\pi d_n/w_n)]$$

"j" zeigt den Imaginärteil in einer komplexen Schreibweise an,

Z_S ist der Wellenwiderstand des Substrates, hier der-

jenige von Galliumarsenid,

Z' ist der transformierte Wellenwiderstand, wie ihn eine Welle "sehen würde", die vom Wellenwiderstand Z_S des Substrats durch ein Zwischenstück mit dem Wellenwiderstand Z_m und der Breite d_m getrennt wäre;

w_m ist die Wellenlänge der betrachteten Strahlungsfrequenz im Material der Schicht mit dem Wellenwiderstand Z_m, d. h. mit dem betreffenden Brechungsindex n_m. $w_m = w_0/n_m$, wobei w_0 die Wellenlänge der Strahlung im freien Raum ist.

Für den Wellenwiderstand Z'', wie ihn nun eine Welle "sehen würde", falls ein weitere Widerstandswellenstück Z_{m-1} mit einer Dicke d_{m-1} vorgeschaltet wäre, gilt nun sinngemäß

$$Z'' = Z_{m-1}[Z'/Z_{m-1} + j\tan(2\pi d_{m-1}/w_{m-1})] / [1 + j(Z'/Z_{m1})\cdot\tan(2\pi d_{m-1}/w_{m-1})]$$

Die Reflexion R des gesamten Beschichtungsensembles 1 ergibt sich dann zu

$$R = [(1 - Z_{m-x}/Z^{x\prime})/(1 + Z_{m-x}/Z^{x\prime})]^2$$

wobei $Z^{x\prime}$ der zur Schichtoberfläche transformierte Wellenwiderstand ist und Z_{m-x} der Wellenwiderstand des an die oberste Schicht angrenzenden Mediums ist, hier also von Luft. Der Reflexionsverlauf des oben beschriebenen Beschichtungsensembles 1 ist in Figur 3 dargestellt. Die Idee ist es nun, die auf der Struktur des Bschichtungsensembles 1 beruhenden Wellenlängenabhängikeit mit der vom absorbierenden Material gegebenen Absorption für einen vorgegebenen Wellenlängebereich zu kompensieren. Dies läßt sich durch die Wahl des richtigen Orts der Absorberschicht 6 erreichen. Zur Verdeutlichung dieser Überlegung ist der Reflexionsfaktor des Ensembles 1 bei einer Lage der Absorberschicht 6 gegenüber der in

Figur 1 dargestellten Lage einmal um 20 nm nach außen (grob gestrichelt) und einmal um 20 nm nach innen (feingestrichelt) verschoben dargestellt.Die ausgezogene Linie ist die Wellenlänge der Mittenfrequenz von 830 nm mit der der modengekoppelte Laser arbeitet.

Der Intensitätsverlauf parallel zur Flächennormalen in der Beschichtung wird aus der elektrischen Feldstärke analog zum oben beschriebenen Reflexionsfaktor berechnet, wobei auch hier die Phasenbeziehungen der Reflexionen der Teilwellen an der jeweiligen inneren Grenzflächen phasenmäßig überlagert werden müssen, wie z. B. in der oben beschriebenen Veröffentlichung von Hermann A. Haus dargelegt ist.

Der Verlauf der Intensität innerhalb des in Figur 1 dargestellten Beschichtungsensembles 1 für drei verschiedene Wellenlänge im freien Raum von 830 nm, 840 nm und 850 nm ist in Figur 4 dargestellt. Die Wellenlängenangaben beziehen sich immer auf diejenige im freien Raum.

Eine Erzeugung von kurzen modengekoppelte Pulsen insbesondere im Subpikosekunden-Bereich ist mit der in Figur 5a dargestellten Anordnung optischer Komponenten möglich. Die Anordnung hat einen auf einer Wärmesenke 17 angeorndetes als Laserresonatorspiegel mit sättigbarem Absorber wirkendes Beschichtungsensemble 19, das gemäß dem oben beschriebenen Beschichtungsensemble 1 eine maximale Reflexion bei 840 nm hat und als annähernd 100%-Spiegel mit einem 1 - 2% sättigbaren Absorber wirkt. Der andere als Auskoppelspiegel wirkende Resonatorspiegel 20 hat eine Reflexion von 98% und weist eine fachmännische Beschichtung auf, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Als aktives Medium dient ein Cr:LiSAF-Kristall 23 [Chrom dotierter Lithium-Strontium Aluminium Fluorid-Kristall $LiSrAlF_6$] mit 5 mm Dicke und einem Chromgehalt von 3%. Das aktive Medium wird beidseits von je einer Laserdiode 21a sowie 21b der Firma Applied Optronics, Typ AOC-670-400 bei einer Wellenlänge von 670 nm mit einer Leistung von 400 mW optisch gepumpt. Der Pumpstrahlengang ist

in Figur 5a zur Unterscheidung vom ausgezogenen Resonatorstrahlengang 18 gestrichelt dargestellt. Die Strahlung der Dioden 21a und 21b wird mit den Abbildungssysten 22a bzw. 22b in das aktive Medium 23 eingestrahlt. Der Strahlengang im Resonator wird durch drei je eine konkave Reflexionsfläche aufweisende Spiegel 24a, 24b und 24c (Oberflächenkrümmungsradius beträgt bei den beiden "oberen Reflexionsflächen in Figur 5a 10 cm und bei der unteren 20 cm) geformt und umgelenkt. Die beiden in einem Abstand von 59 cm von einander distanzierten Prismen 25a und 25b werden zur Erzeugung einer negativen Dispersion der Gruppengeschwindigkeit im Laserresonator verwendet. Diese negative Dispersion der Gruppengeschwindigkeit ist zur Erzeugung der obengenannten kurzen Pulse notwendig.

Eine Variante zu dem in Figur 1 dargestellten Beschichtungsensemble zeigt Figur 6. Die Doppelschichtenfolgen 33 und 34 sowie auch das Material des Substrats 35 sind identisch zu denjenigen in Figur 1. Auf der Schicht 33 liegt nun eine 10 nm dicke GaAs-Schicht 38, gefolgt von einer 130 nm dicken Zwischenschicht 37 aus Aluminiumarsenid (AlAs), dann folgt eine 30 nm dicke sättigbar absorbierende mit Aluminium dotierte Galiumarsenidschicht 39. Die Schicht 39 besteht bevorzugt aus $Al_{6\%}Ga_{94\%}As$ und wird insbesondere mit einem sog. "low-temperature MBE-Verfahren" bei ca 400°C hergestellt. Als Deckschicht 41 dient eine 55 nm dicke Aluminium-Galliumarsenid-Schicht $AL_{65\%}Ga_{35\%}As$. Die Reflexion dieses Ensembles 42 liegt bei einer Wellenlänge von 840 nm ungesättigt bei ungefähr 98%.

Durch die Wahl der Dotierung lassen sich Galliumarsenidschichten von sättigbar absorbierenden Schichten in nicht absorbierende abhängig von der auf sie treffenden Strahlungswellenlänge einstellen. So verschiebt bei einer Dotierung von 0 bis 6% Aluminium bei der der Galliumanteil durch denjenigen des Aluminiums ersetzt wird und der Arsenanteil konstant gelassen wird, die Absorptionsgrenze von 870 nm zu 830 nm. Bei einem Aluminiumgehalt von 15% liegt die Absorptionsgrenze bereits bei 800 nm. Der Schichtenaufbau wurde nun derart ge-

wählt, daß sich eine negative Dispersion der Gruppengeschwindigkeit der Strahlungswellen im Laserresonator ergibt. Ferner wurde darauf geachtet, daß ein gutes Auswachsen der betreffenden Schichtung sowie eine hohe Resistenz auch bei hohen Strahlungsintensitäten gegeben ist.

Selbstverständlich können auch andere Materialzusammensetzungen z. B. von SiO_2 und TiO_2 wie in R. Szipöcs et al. "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers", Optics Letters, Vol. 19, No. 3, 1994, Seite 201 - 203 beschrieben ist, gewählt werden. Das von R. Szipöcs et al. beschriebene Beschichtungsensemble erzeugt jedoch lediglich nur eine negative Dispersion der Gruppengeschwindigkeit. Dieser Schichtaufbau, wie er insbesondere in der dortigen Figur 1 dargestellt ist, muß nun noch erst aufgrund der erfinderischen Erkenntnis dahingehend abgeändert werden, daß die sättigbar absorbierenden Schichten an vorbestimmten Orten in das Beschichtungsensemble integriert werden. Mit der erfindungsgemäßen Erkenntnis lassen sich die betreffenden Schichten gezielt integrieren, so daß nicht nur eine negative Dispersion der Phasengeschwindigkeit erreichbar ist, sondern zusätzlich die Eigenschaft einer sättigbaren Absorption optimal integrierbar ist. Hierzu müssen lediglich einzelnen Schichten ohne Änderung der Phasenbeziehungen durch diejenige mit sättigbarer Absorption analog zu dem in Figur 4 dargestellten Verlauf der Intensität über dem Schichtenaufbau ersetzt werden.

Eine Variante zu dem in der Veröffentlichung von R. Szipöcs et al. beschriebenen Beschichtungsaufbau ist in C. Fontaine et al., "Generalization of Bragg reflector geometry: Application to (Ga, Al)As-(Ca,Sr)F_2 reflectors", J. Appl. Phys. 68, (10), 1990, Seite 5366 - 5368 ausgeführt. In die hier dargelegten Schichtenfolgen lassen sich dann erfindungsgemäß, analog zu den obigen Ausführungen, die sättigbar absorbierende Schicht bzw. Schichten integrieren. Mit einem derartigen Aufbau sind Pulsbreiten unter 10 fs erreichbar.

Figur 7 zeigt die Resonatoranordnung eines modengelockten Lasers, wobei einer der Laserresonatorspiegel 43 mit dem oben beschriebenen Beschichtungsensemble 42 für eine maximale reflexion bei 840 nm beschichtet ist und als annähernd 100%-Spiegel ausgebildet ist. Der andere als Auskoppelspiegel wirkende Resonatorspiegel 45 hat eine Reflexion von 99% und weist eine fachmännische Beschichtung auf, auf die hier nicht weiter eingegangen wird. Als aktives Medium dient ein Cr:LiSAF-Kristall 47 [Chrom dotierter Lithium-Strontium Aluminium Fluorid-Kristall $LiSrAlF_6$] mit 2 mm Dicke, so daß der Lichtweg bei Brewsterwinkel 2 mm im Kristall beträgt, und einem Chromgehalt von 3%. Das aktive Medium wird von einer Laserdiode 49 der Firma Applied Optronics, Typ AOC-670-400 bei einer Wellenlänge von 670 nm mit einer Leistung von 400 mW optisch gepumpt. Der Pumpstrahlengang ist in Figur 7 zur Unterscheidung vom ausgezogenen Resonatorstrahlengang 48 gestrichelt dargestellt. Die Strahlung der Diode 49 wird mit dem Abbildungssystem 51 in das aktive Medium 47 eingestrahlt. Für den tatsächlichen Pumpvorgang stehen von den 400 mW dann noch etwa 300 mW zur Verfügung. Der Strahlengang im Resonator wird durch zwei je eine konkave Reflexionsfläche aufweisende Spiegel 50a und 50b (Oberflächenkrümmungsradius beträgt 10 cm) geformt und umgelenkt. der Abstand des Resonatorspiegels 43 beträgt 27 cm vom "Umlenkspiegel 50a und der Abstand des Auskoppelspiegels 45 vom Umlenkspiegel 50b 70 cm.

Bei einer Pumpleistung von 300 mW wurde eine mittlere Laserausgangsleistung von 25 mW bei Laserpulsen von 160 fs erreicht. Hervorzuheben ist bei der hier gewählten Laserresonatoranordnung der einerseits robuste Aufbau und die unkritische Justage, verglichen mit der Justage bei Verwendung eines sog. "Kerr lens modelocking". Auch kann in dieser Anordnung auf das äußerst schwer zu justierende Prismenpaar 25a und 25b verzichtet werden.

Anstelle einen der als Resonatorspiegel wirkenden Beschichtungsensembles 19 bzw. 43, kann auch eine oder mehrere Oberflächen der Spiegel 20, 45, 24a, 24b, 24c, 50a oder 50b

eine analoge, jedoch dann nicht reflektierende Ensemblebeschichtung aufweisen.

Anstelle die obenbeschriebenen Beschichtungsensembles als Reflektoren auszubilden, können sie auch als Antireflektore ausgebildet sein und dann direkt z. B. auf eine oder beide Seitenflächen des aktiven Mediums bzw. einer oder mehreren Flächen der Prismen 25a und/oder 25b sowie anderer hier nicht dargestellter optischer Komponeten innerhalb des Laserresonators in dessen Strahlengang aufgebracht werden.

Anstelle nur einer einzigen sättigbar absorbierenden Schicht 6 bzw. 39 im Beschichtungsensemble 1 bzw. 42 können selbstverständlich auch mehrere dieser Schichten vorhanden sein. Sie müssen nur an analogen Orten betreffend der Strahlungsintensität innerhalb des Ensembles (siehe Figur 4) liegen.

Neben den obenerwähnten Gallium, Arsen und Aluminium enthaltenden Halbleitermaterialien können selbstverständlich auch andere Halbleitermaterialien, wie z. B. die auf der Basis von Indium, Phosphor, Fluoriden (CaF_2, BaF_2, ...) verwendet werden.

Die Figuren 8a bis 8e zeigen Beispiele unterschiedlicher Beschichtungsensembles als Varianten zu denjenigen der Figuren 1 und 6. Die Breite der einzelnen Schichten ist aus der "Rechteckkurve" in den jeweiligen Teilabbildungen α und β ersichtlich. Zur Unterscheidung der jeweiligen Schicht ist deren Brechungsindex n aufgetragen. Es sind alternierend Schichten 53 aus GaAs mit einem Brechungsindex von $n \approx 3,5$ und Schichten 55 aus AlAs mit einem Brechungsindex von $n \approx 2,95$ vorhanden. Die Beschichtungsensembles der Figuren 8a bis 8e unterscheiden sich voneinander in den obersten drei Schichten. Als "oben" wird das freie Beschichtungsende - der Übergang zur Luft - bezeichnet. Die unterste Teilabbildung Γ zeigt jeweils den Verlauf der Reflexion R des betreffenden gesamten Beschichtungsensembles über der Wellenlänge Lambda

in Mikrometer (μm) der einfallenden Strahlung.

In Figur 8a ist die oberste Schicht 56 eine GaAs-Schicht mit einer optischen Schichtdicke einer Halbwellenlänge bezogen auf 1,064 μm (Freiraumwellenlänge), welche eine Absorberteilschicht 57 aus InGaAs mit einem Brechungsindex von $n \approx 3,6$ enthält. Als Freiraumwellenlänge wird die Wellenlänge im freien Raum (Vakuum) verstanden. In der betreffenden Schicht ändert sich jedoch gemäß dem vorhandenen Brechungsindex der Wert der Wellenlänge entsprechend. Die Lage der Absorberteilschicht 57 ist derart gewählt, daß sie im Maximum des Intensitätsverlaufs einer Resonatorwelle liegt. Diese Lage sowie den gesamten normierten Intensitätsverlauf 59a der Laserresonatorwelle im Beschichtungsensemble zeigt die Teilabbildung α der Figur 8a. Eine in bezug auf die Beschichtungsdickenabmessungen vergrößerte Darstellung für die oberen Beschichtungsteilschichten zeigt die Teilabbildung β in Figur 8a. Hier ist analog zur Teilabbildung α der Intensitätsverlauf mit 59b angegeben.

Ein zu Figur 8a analoges Beschichtungsensemble zeigt Figur 8b, wobei hier jedoch die oberste Schicht 60 eine GaAs-Schicht mit der optischen Schichtdicke einer Viertelwellenlänge bezogen auf 1,064 μm ist. Die absorbierende Schicht 61 liegt hier ebenfalls in dieser Schicht 60, jedoch am Ort einer bereits abfallenden Intensität 62a bzw. 62b.

Eine hierzu weitere Beschichtungsvariante zeigt Figur 8c. Hier ist die absorbierende Schicht 63 ebenfalls in die oberste Schicht 64 eingelagert. In Gegensatz zu den obenbeschriebenen Beschichtungsensembles ist hier die oberste Schicht 64, eine Schicht mit einem niedrigen Brechungsindex, nämlich $n \approx 2,95$ aus AlAs. Die optische Schichtdicke entspricht einer Halbwellenlänge bezogen auf 1,064 μm. Die absorbierende Schicht 63 ist annähernd in einem der Intensitätsmaxima, hier im absoluten Intensitätsmaximum 65 angeordnet.

Weitere Varianten von Beschichtungsensembles zeigen die

Figuren 8d und 8e. Im Gegensatz zu den obenbeschriebenen ist nun die absorbierende Schicht 68 bzw. 70 nicht mehr in der obersten Schicht, sondern in einer tiefer liegenden, hier beispielsweise in der drittobersten Schicht 67 bzw. 69 eingebettet. In Figur 8d liegt die absorbierende Schicht 68 annähernd am Ort eines relativen Intensitätsmaximums. In Figur 8e hingegen liegt die absorbierende Schicht 70 im abfallenden Teil nach einem relativen Intensitätsmaximum.

Die Figuren 8a bis 8e zeigen eine Weg auf, wie die optimale Lage des sättigbaren Absorbers in dem Beschichtungsensemble gefunden werden kann. Bei einer sorgfälltigen Auswahl der Absorberlage kann eine gewünschte Breitbandigkeit in bezug auf den gewünschten Wellenlängenbereich erzielt werden. In den dargestellten Beispielen ist ein Bereich von 50 nm erreicht worden. Ferner ist die effektive, d.h. von "außen gesehene" Sättigungsintensität im Beschichtungsensemble z. B. erhöhbar, wenn der Absorber tiefer eingebettet wird, wie diese beispielsweise Figur 8d zeigt.

Figur 9 zeigt ein breitbandiges Beschichtungsensemble mit einem sättigbaren Absorber analog zu den oben genannten Ausführungen für die Erzeugung gepulster Laserstrahlung mit Pulsbreiten im 10-fs-Bereich [fs ≡ Femtosekunde (1 fs = 10^{-15} Sekunden)] in einem nicht dargestellten Laserresonator. Als aktives Lasermaterial wird ein (nicht dargestellter) Ti:Saphir-Laser-Kristall mit einer Dicke von 2 mm verwendet. Die Resonatorspiegel sind in einem gegenseitigen Abstand von 10 cm angeordnet, wodurch der Laserstrahldurchmesser in der unten beschriebenen absorbierenden Schicht 36 µm beträgt. Der (nicht dargestellte) Auskoppelspiegel (einer der beiden Resonatorspiegel) koppelt 3% der Laserintensität aus dem Laserresonator aus. Die in den Figuren 9b und 9c gezeigten Beschichtungsensembles zur Verwendung in dem obenerwähnten, nicht dargestellten Laserresonator weisen im Gegensatz zu den Beschichtungsensembles der Figuren 1, 4 und 8a bis 8e eine metallische Schicht, hier eine Silberschicht auf. Es können jedoch auch andere Metallschichten, wie beispielsweise Gold-

schichten vorhanden sein.

Entgegen einem üblichen Beschichtungsverfahren ist hier ein neues, sich grundsätzlich von den bereits bekannten unterscheidendes Herstellungsverfahren verwendet worden. Bei diesem Verfahren wird nämlich, wie unten beschrieben, die zu unterst liegende Metallschicht als letzte hergestellt. D. h. der Schichtenauftrag erfolgt in einer umgekehrten Reihenfolge.

Zur Herstellung des in Figur 9b dargestellten Beschichtungsensembles wird, wie in Figur 9a angedeutet, zuerst auf einem GaAs-Substrat 71 eine 300 nm dicke $Al_xGa_{1-x}As$-Schicht 72 mit x=0,65 aufgebracht. Auf diese Schicht 72 wird dann eine 40 nm dicke GaAs-Schicht 73 aufgebracht. Es folgt nun eine weitere 20 nm dicke Schicht 74 aus $Al_xGa_{1-x}As$-Schicht 72 mit x=0,65. Auf die Schicht 74 wird in einem Tieftemperaturverfahren (400°C) eine 15 nm dicke GaAs-Absorber-Schicht 75 aufgebracht, dann folgt eine 70 nm dicke AlAs-Schicht 76 und eine 3 nm dicke GaAs-Schicht 77, welche später eine Oxidation der Schicht 76 vermeiden soll. Auf die Schicht 77 kommt dann eine 5 µm dicke Silberschicht 78.

Nach diesem Beschichtungsverfahren wird das beschichtete Substrat 71 in etwa 5 mm x 5 mm große Stücke zerteilt. Diese Stücke werden dann mit einem Zweikomponentenepoxydkleber 79 auf einem Siliziumsubstrat 80 aufgeklebt, um eine ausreichende Wärmeableitung zu erhalten. Die Stücke werden in einem nächsten Verfahrensschritt bei 80°C acht Stunden lang unter einem Oberflächengewicht von 500 g belastet wärmebehandelt. Als nächstes wird das GaAs-Substrat 71 auf 100 µm heruntergeläppt und mit in Wasserstoffperoxid [$NH_4OH:H_2O_2$ (1:25)] gelösten Ammoniak mit einer Ätzgeschwindigkeit bei Raumtemperatur von etwa 6 µm pro Minute bis zur Schicht 72 geätzt. Die Schicht 72 wird anschließend mit Flußsäure bis zur Schicht 73 entfernt. Die Schicht 73 wird analog zur Schicht 71 mit in Wasserstoffperoxid [$NH_4OH:H_2O_2$ (1:200)] gelösten Ammoniak geringerer Konzentration weggeätzt. Für eine gute gleichmäßige

Ätzung müssen die 5 mm x 5 mm großen Stücke bewegt werden. Zum Schutz der Ecken und der Silberschicht 78 wird während des Ätzvorgangs ein Wachsauftrag verwendet. Die Wachsschutzschicht kann später mit Trichloethylen entfernt werden. Durch die Ätzung sind die für die Herstellung der Beschichtungsensembles notwendigen Schichten, jedoch optisch nicht verwendbaren Schichten entfernt worden. Die oberste Schicht ist nun die Schicht 74.

Das in Figur 9c abgebildete Beschichtungsensemble ist analog zu demjenigen in Figur 9b hergestellt worden. Die Schichten 83, 84, 85 und 86 entsprechen den Schichten 78, 77, 76 und 75 des Beschichtungsensembles der Figur 9b. Im Gegensatz zu demjenigen in Figur 9b ist jedoch hier eine 82 nm dicke AlGaAs-Schicht 87 vorhanden, auf der eine Antireflexbeschichtung 89 mit Schutzschicht 90 sitzt. In den Figuren 9b und 9c ist jeweils der örtliche Verlauf der Intensität mit dem Bezugszeichen 91a bzw. 91b eingezeichnet.

Das in Figur 9b dargestellte Beschichtungsensemble arbeitet im (nicht dargestellten) Laserresonator mit geringer Güte in Antiresonanz. Hierdurch wird eine ultrakurze Pulsbreitenbegrenzung (ultrashort-pulse-width limitation), hervorgerufen durch eine vergrößerte Wellenlängen abhängige Reflexionsänderung und eine vergrößerte Gruppengeschwindigkeitsdispersion, vermieden [siehe beispielsweise L.R.Brovelli, U. Keller, T.H.Chiu, J.Opt.Soc.Am. B 12, 311 (1995)]. Die Reflexion des Beschichtungsensembles ist größer 94% bei 800 nm. Der Reflexionsverlauf zeigt nur eine geringe Wellenlängenabhängigkeit im Bereich zwischen 700 nm und 1200 nm.

Anstelle in Antiresonanz zu arbeiten, kann auch mit dem in Figur 9c dargestellten Beschichtungsensemble in Resonanz gearbeitet werden.

Ein Beispiel für ein Beschichtungsensemble mit III-V-Halbleiter- und Fluoridschichten zeigt für eine Laserwellenlänge von 1,4 μm Figur 10. Es sind hier drei je 220 nm dicke

Schichten 94a bis 94c aus BaF_2 vorn und hinten (sandwichartig) mit jeweils 10 nm dicken einer CaF_2-Schicht 93a bis 93c versehen. Zwischen diesen "Sandwiches" ist jeweils eine GaAs-Viertelwellenschicht 97a bis 97c (100 nm Schichtdicke) angeordnet. Auf einem GaAs-Substrat 96 ist in einem Beschichtungsprozess eine Schicht aus GaAs 95 aufgebacht. Die Schicht 95 dient nur dazu ein gutes Halten und Aufwachsen für die nachfolgenden Schichten zu ermöglichen.

Der Brechungsindexunterschied zwischen CaF_2 und BaF_2 ist gering, jedoch hat BaF_2 eine große Elastizitätskonstante, was die Ausbildung von Rissen in der Beschichtung während des Abkühlvorgangs stark verringert. Auch auf bzw. in diesem Beschichtungsensemble können Schichten mit sättigbarem Absorber integriert werden. Für kürzere Wellenlängen wird bevorzugt anstelle von GaAs, AlGaAs verwendet; GaAs zeigt Absortion unter 900 nm.

Die obenbeschriebenen Beschichtungsensembles mit Schichten aus GaAs/AlAs oder AlGaAs/AlAs weisen im Gegensatz zu denjenigen mit CaF_2 und BaF_2 für einen Ti-Saphir-Laser eine etwas zu kleine Bandbreite auf, um dessen Bandbreite voll ausnützen zu können. Für einen breitbandigen Ti-Saphir-Laser wird man demzufolge auf ein Beschichtungsensemble mit CaF_2 und BaF_2 zurückgreifen. Gegenüber dem obenbeschriebenen Beschichtungsensemble mit Metallschicht besteht hier der Vorteil in einem epitaktischen Aufeinanderaufwachsen der Schichten.

Als Halbleitermaterialien können beispielsweise GaAs, AlGaAs, InGaAs, GaInP, GaInAsP usw. und als Fluoride CaF_2, BaF_2, SrF_2, ... verwendet werden.

Neben den in den Figuren 5 und 7 dargestellten Resonatorkonfigurationen können auch noch andere verwendet werden. Der in Figur 11 dargestellte Resonator hat einen Laserkristall 99, durch dessen eines für die Laserwellenlänge verspiegeltes Ende 100 hindurch gepumpt wird. Die mit dem Laser-

kristall 99 erzeugte Resonatorwelle 101 wird über die Umlenkspiegel 102, 103 und 104 umgelenkt. Der Laserkristall 99 wird mit dem Pumplichtstrahl 98 optisch gepumpt. Der sättigbare Absorber mit einem der obenbeschriebenen Beschichtungsensembles ist als Resonatorendspiegel 105 angeordnet. Die Laserstrahlung wird am Umlenkspiegel 103 ausgekoppelt.

Der Laserresonator gemäß Figur 12 hat ebenfalls einen sättigbaren Absorber in einem der obenbeschriebenen Beschichtungsensembles. Das Beschichtungsensemble 107 ist in den Resonatorendspiegel integriert. Ferner hat der Resonator einen Endspiegel 112 und vier Umlenkspiegel 108 bis 111, wobei das Element 110 gleichzeitig aktives Medium (Laserkristall) und Spiegel in einem ist. Laserenergie wird über den Endspiegel 112 teilweise ausgekoppelt. Das optische Pumpen des Laserkristalls 110 erfolgt über den Pumplichtstrahl 114.

Einen miniaturisierten Laserresonator zur Erzeugung kurzer Pulse analog den bereits obenbeschriebenen Resonatoren, zeigt Figur 13. Auf einem Montageplättchen 113 ist ein Beschichtungsensemble 115 mit sättigbarem Absorber gemäß einer der obengenannten Ausführungen als Resonatorendspiegel aufgebracht. Direkt auf diesem Beschichtungsensemble 115 ist der Laserkristall 117 aufgesetzt. (Es könnte aber auch der Kristall an der mit 116 gekennzeichneten Stelle mit dem Beschichtungsensemble versehen sein.) Die Dicke von etwa 200 μm des Laserkristalls 117 plus die "Eindringtiefe" der Strahlung in das Beschichtungsensemble bestimmen die Resonatorlänge. Direkt auf der dem Ensemble 115 gegenüberliegenden Seite des Laserkristalls 117 ist der Auskoppelspiegel 119 mit entsprechender Beschichtung für den auszukoppelnden Laserstrahl 121 und für eine Einkopplung des Pumplichtstrahls 122 angeordnet. Laserstrahl 121 und Pumplichtstrahl 122 werden durch einen entsprechend beschichteten Strahlteiler 123 voneinander getrennt.

Patentansprüche

1. Optische Komponente zur bevorzugten Verwendung innerhalb eines Laserresonators (20, 2324a, 24b, 25a, 25b; 43, 45, 47, 50a, 50b; 100, 99, 102, 103, 104, 105; 107, 108, 109, 110, 111, 112; 115, 117, 119) zur Erzeugung gepulster Laserstrahlung, insbesondere von gepulster Strahlung im Mikro- bis Femtosekunden-Bereich, gekennzeichnet durch ein als sättigbarer Absorber wirkendes mehrschichtig phasengekoppeltes Beschichtungsensemble (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60, 70; 115) mit wenigstens einer sättigbar absorbierenden Schicht (6, 39).

2. Optische Komponente nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß das Beschichtungsensemble (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60, 70; 115) als Vergütungsbeschichtung auf wenigstens einer der im Resonatorstrahlengang befindlichen Komponenten ausgebildet ist.

3. Optische Komponente nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß das Beschichtungsensemble (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60, 70; 115) die Beschichtung wenigstens eines der Resonatorspiegel (19, 20; 43, 45; 105; 107; 115) ist.

4. Optische Komponente nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gelennzeichnet, daß wenigstens eine der im wesentlichen ein absorbierendes Material enthaltenden Schicht (6, 39; 57; 61; 63; 68; 70) an dem Ort bzw. den Orten der Schichtenfolge angeordnet ist bzw. sind, an dem bzw. an denen eine hohe Strahlungsintensitätsstärkeänderung und eine hohe Absorptionsänderung in wenigstens einem Frequenzteilbereich der Resonatorstrahlung sich ergibt.

5. Optische Komponente nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtenfolge, deren Materialien und deren optische Schichtdicken derart ausgewählt sind, daß das Beschichtungsensemble (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60, 70; 115) einen vorgegebenen Reflexions- bzw. Transmissionsverlauf über der Frequenz der Resonatorwellen aufweist.

6. Optische Komponente nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das Schichtmaterial zur sättigbaren Absorption (6, 39; 57; 61; 63; 68; 70) ein Halbleitermaterial insbesondere im wesentlichen Galliumarsenid, Galliumaluminiumarsenid oder Galliumindiumarsenid ist.

7. Optische Komponente nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß das Material des Beschichtungsensembles (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60, 70; 115) im wesentlichen aus unterschiedlichen Halbleitermaterialien besteht und bevorzugt Arsen, insbesondere ein Metall oder in einer besonderen Ausführungsform wenigstens ein Fluorid als wesentlichen Verbindungspartner enthält.

8. Optische Komponente nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Schichtenfolgen des Beschichtungsensembles derart ausgebildet sind, daß sich für eine einfallende Resonatorstrahlung eine negative Dispersion der Gruppengeschwindigkeit (negative group-delay dispersion; negative group velocity dispersion) ergibt.

9. Optische Komponente nach Anspruch 7 und 8, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens in einem Teil der Schichten des Beschichtungsensembles (1; 42; 53, 55, 56, 57; 53, 55, 60, 61; 53, 55, 63, 64; 53, 55, 67, 68; 53, 55, 60,

70; 115) ein Prozentanteil an Aluminium beigegeben ist, wobei der Aluminiumanteil entsprechend der Mittenfrequenz der Resonatorstrahlung derart eingestellt wird, daß in den zur sättigbaren Absorption vorgesehenen Schichten sich eine sättigbare Absorption zusammen mit der geforderten negativen Gruppengeschwindigkeitsdispersion zur Erzeugung extrem kurzer modegelockter Pulse ergibt.

10. Laser zur Erzeugung kurzer Pulse, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine optische Komponente in Laserresonator (20, 2324a, 24b, 25a, 25b; 43, 45, 47, 50a, 50b; 100, 99, 102, 103, 104, 105; 107, 108, 109, 110, 111, 112; 115, 117, 119) gemäß Patentanspruch 1 ausgebildet ist.

11. Laser zur Erzeugung kurzer Pulse, dadurch gekennzeichnet, daß wenigstens eine optische Komponente in Laserresonator (20, 2324a, 24b, 25a, 25b; 43, 45, 47, 50a, 50b; 100, 99, 102, 103, 104, 105; 107, 108, 109, 110, 111, 112; 115, 117, 119) gemäß Patentanspruch 8 ausgebildet ist.

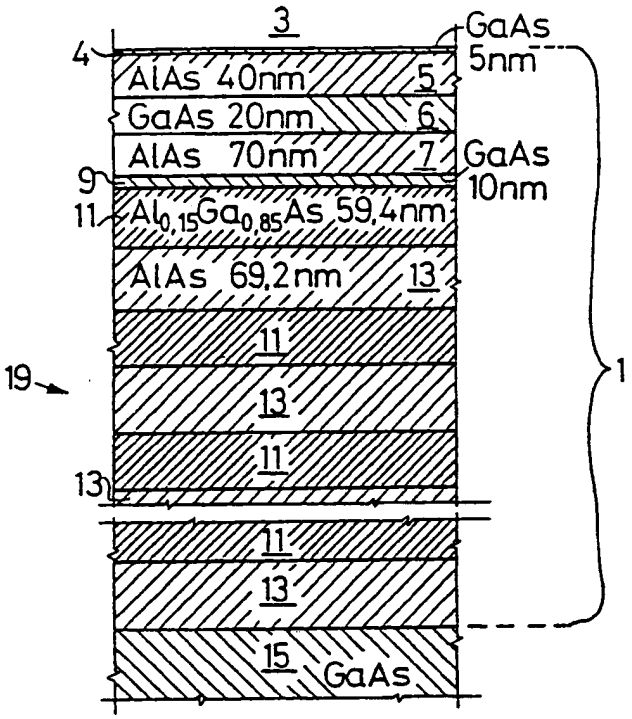


Fig. 3

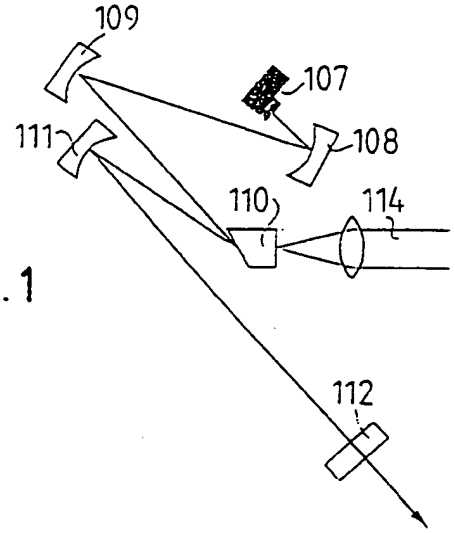


Fig. 12

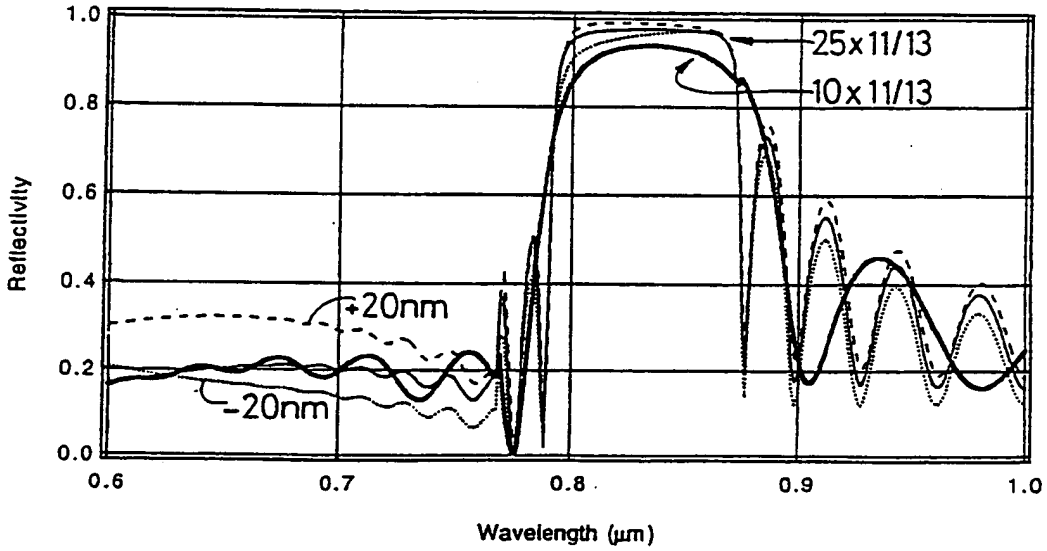


Fig. 1

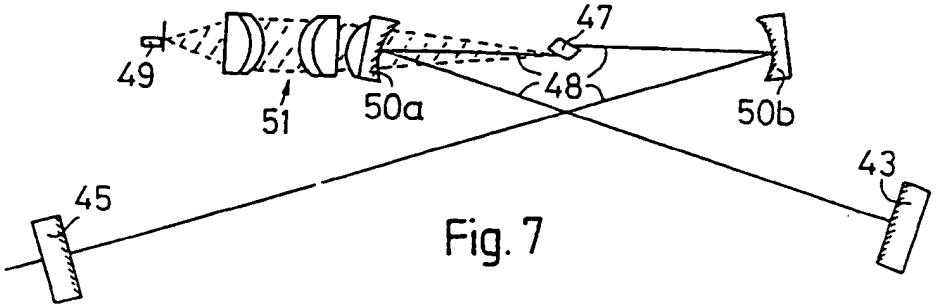


Fig. 7

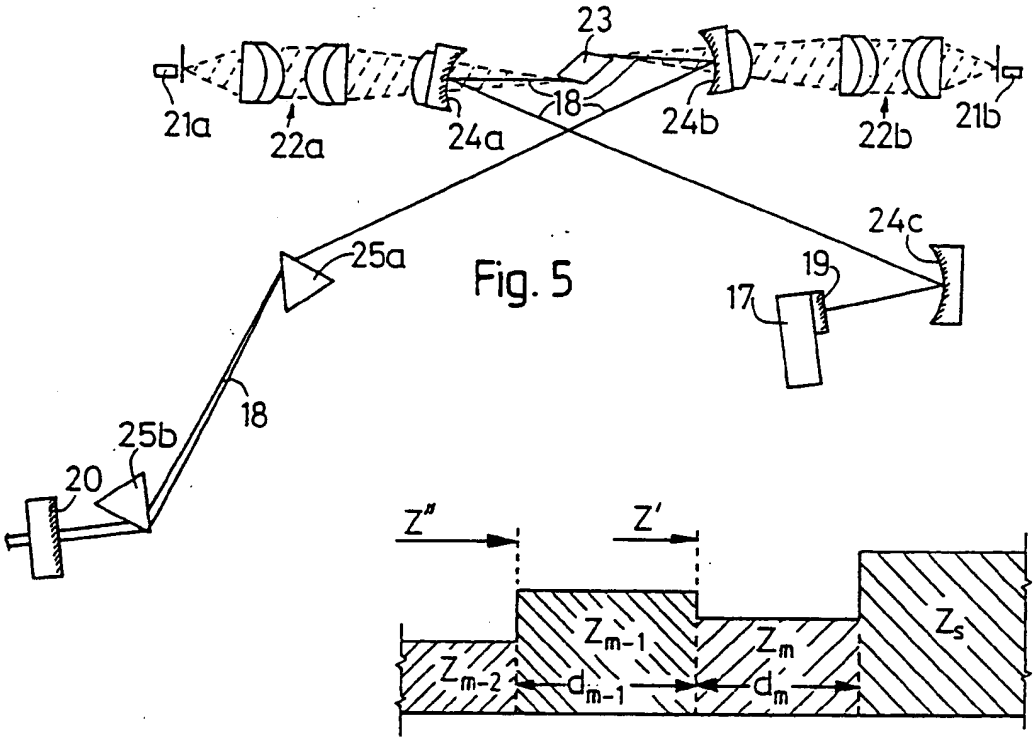


Fig. 5

Fig. 2

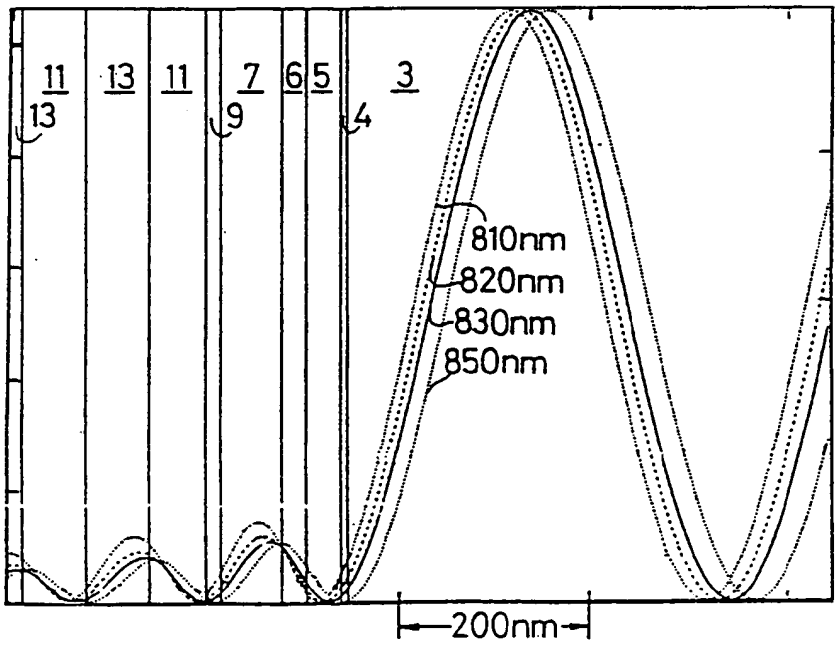


Fig. 4

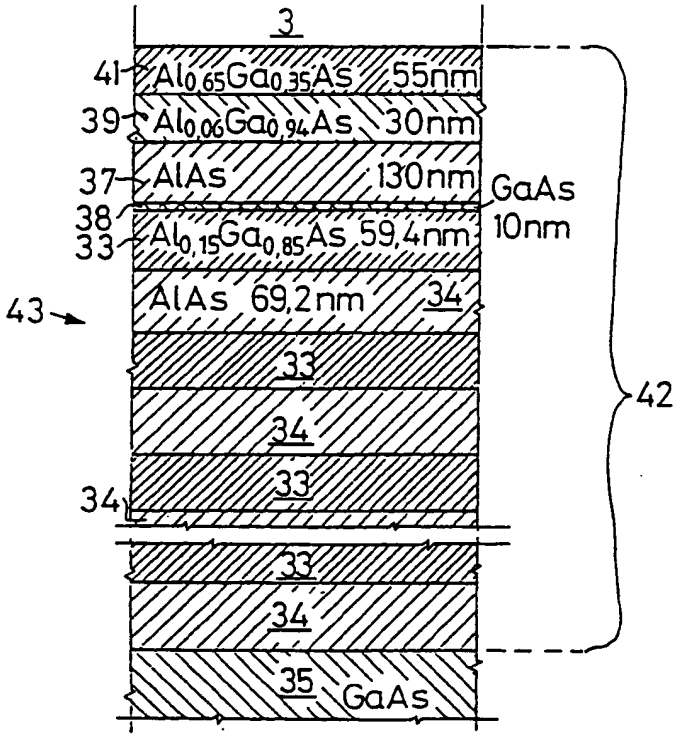

3
41
$Al_{0,65}Ga_{0,35}As$ 55nm
39
$Al_{0,06}Ga_{0,94}As$ 30nm
37
AlAs 130nm
GaAs 10nm
38
33
$Al_{0,15}Ga_{0,85}As$ 59,4nm
43
AlAs 69,2nm
34
33
34
33
34
42
34
33
34
35 GaAs

Fig. 6

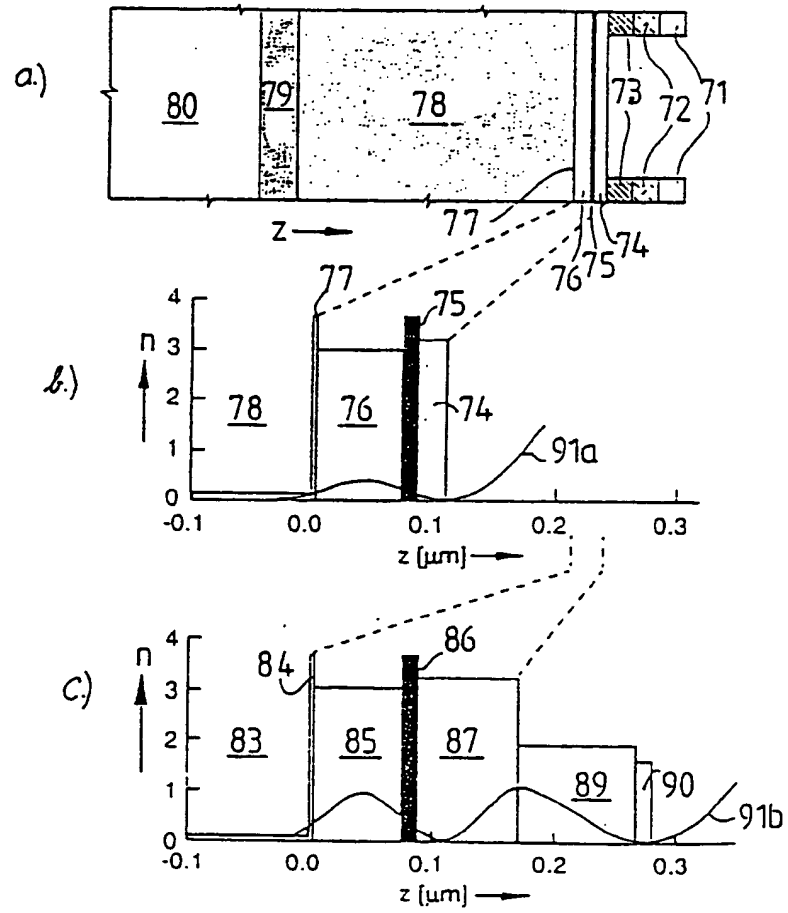

a.)
80
79
78
73
72
71
z
77
76
75
74
b.)
n
77
75
78
76
74
91a
z [µm]
c.)
n
84
86
83
85
87
89
90
91b
z [µm]

Fig. 9

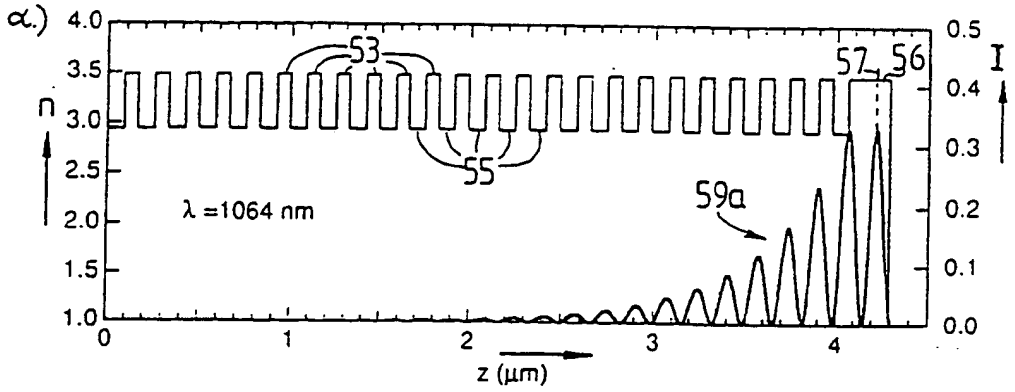
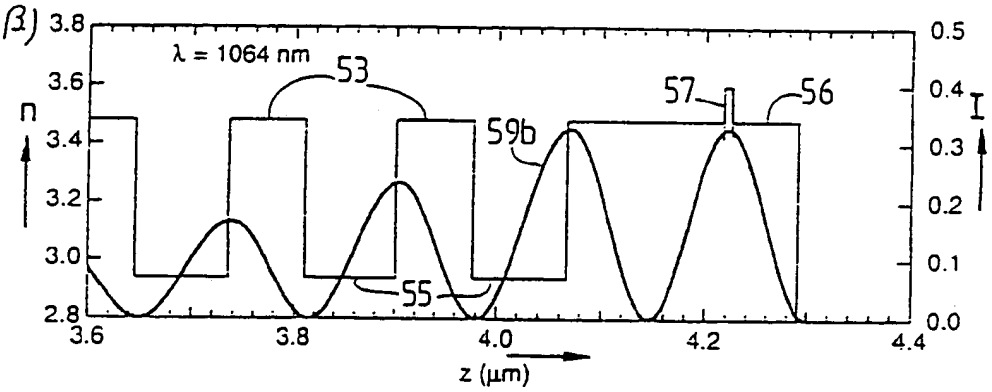
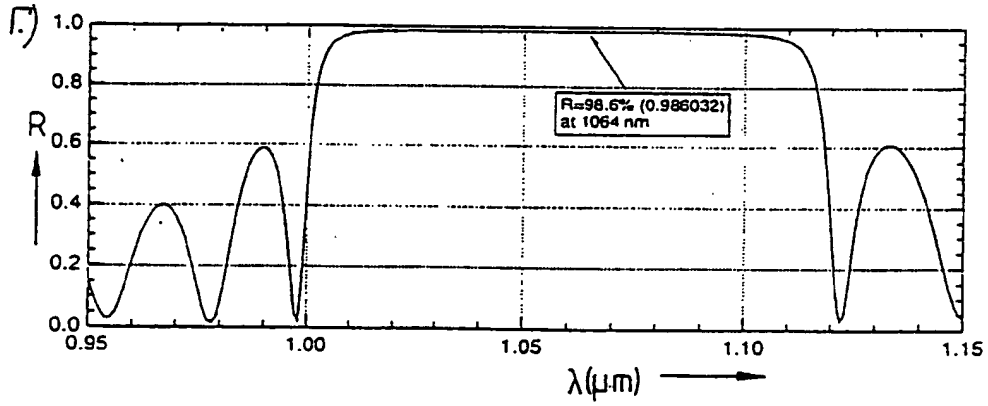

α.)
n
I
λ =1064 nm
53
55
57
56
59a
z (μm)

Fig. 8a


β)
n
I
λ = 1064 nm
53
57
56
59b
55
z (μm)


γ)
R
R=98.6% (0.986032)
at 1064 nm
λ(μm)

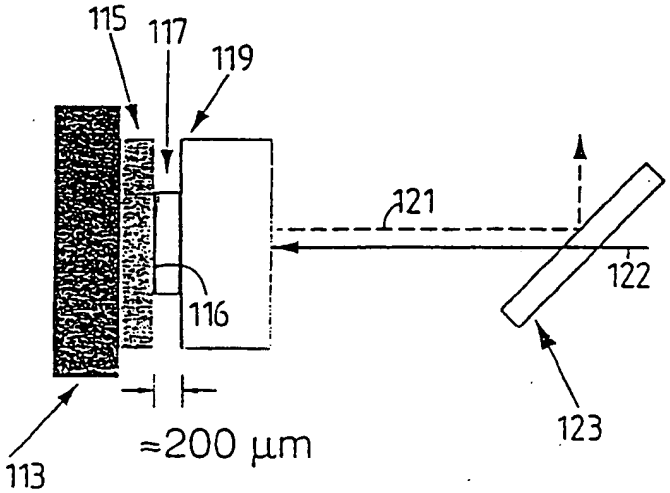

115
117
119
121
122
116
123
113
≈200 μm

Fig.13

Fig.8b

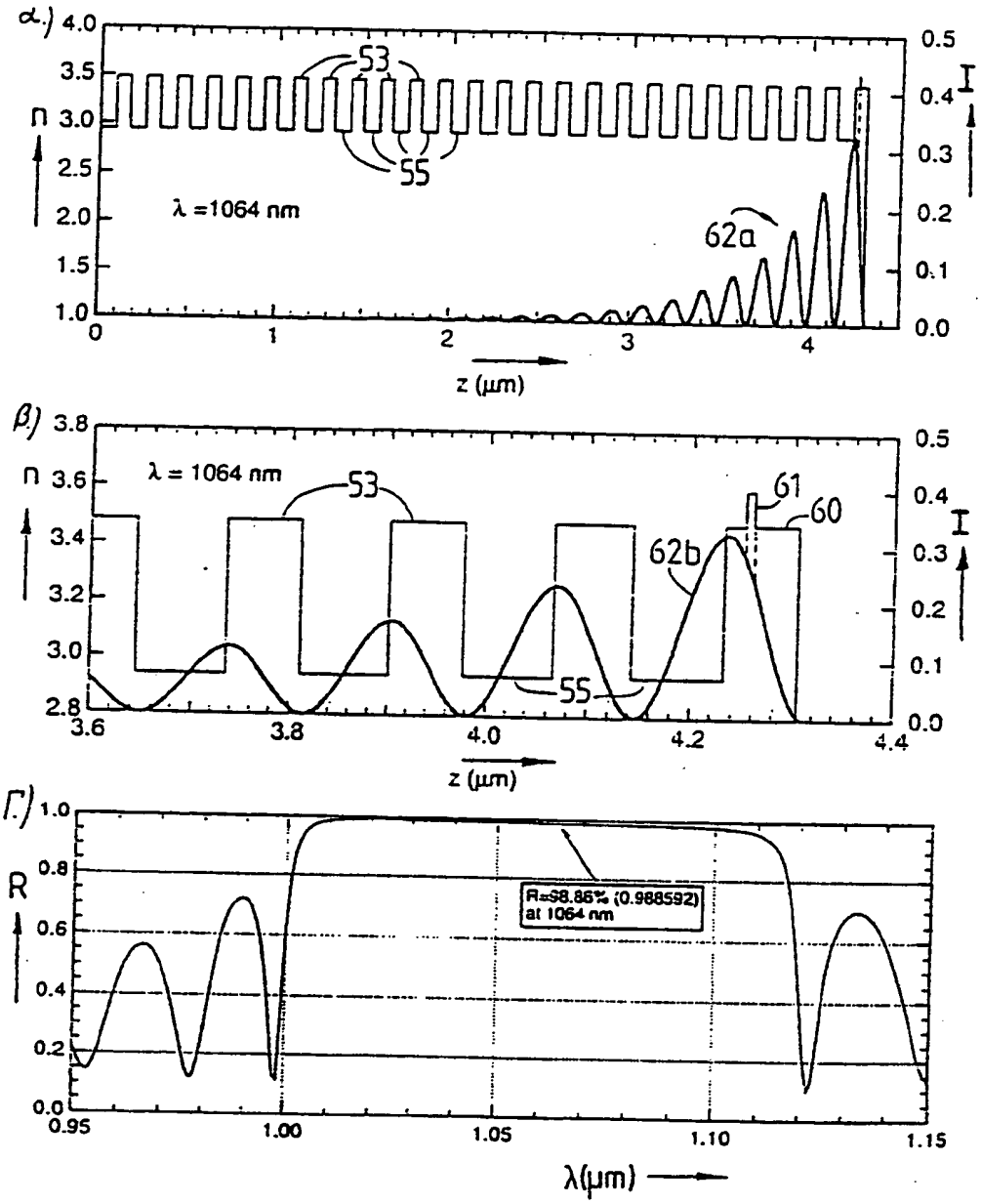

α)
n
I
λ =1064 nm
53
55
62a
z (μm)
β)
λ = 1064 nm
61
60
62b
γ)
R
R=98.86% (0.988592) at 1064 nm
λ(μm)

Fig.10

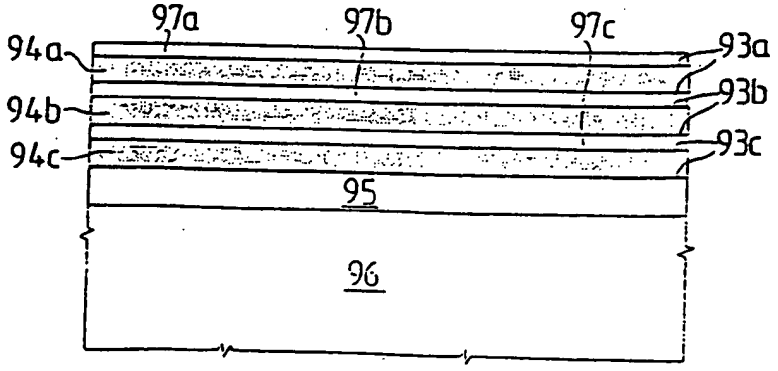

97a
97b
97c
94a
94b
94c
93a
93b
93c
95
96

Fig. 11

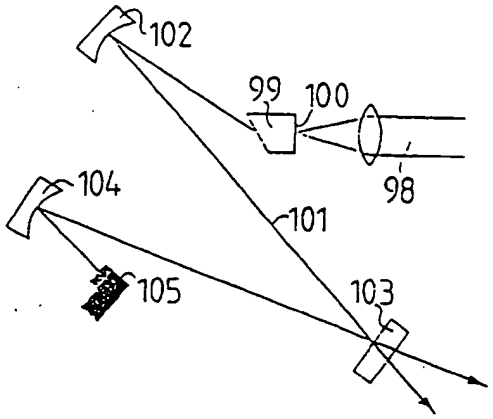
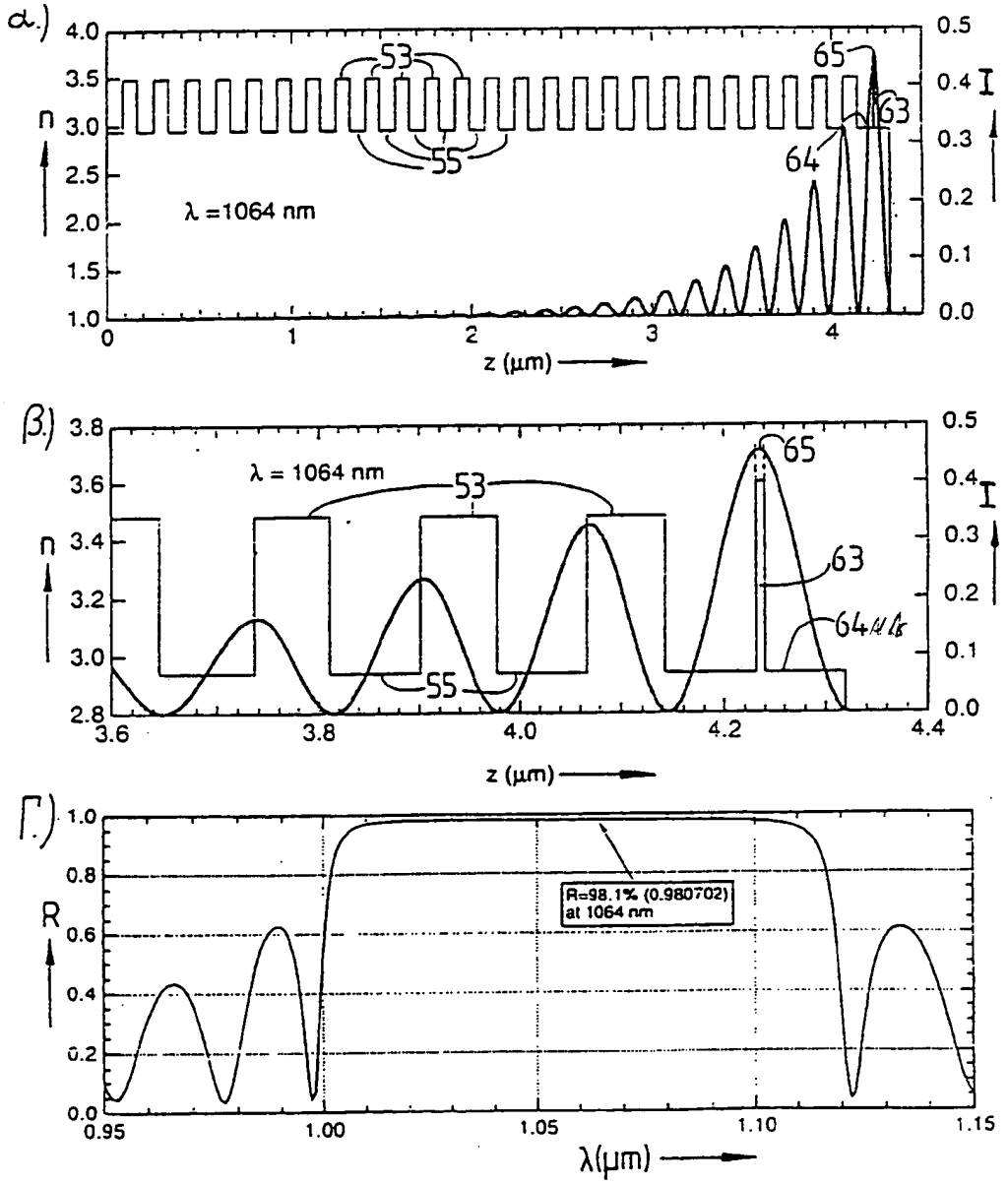

102
99
100
98
104
101
105
103

Fig. 8c


α.)
n
I
λ =1064 nm
53
55
63
64
65
z (μm)
β.)
λ = 1064 nm
53
55
63
64
65
z (μm)
Γ.)
R
R=98.1% (0.980702)
at 1064 nm
λ(μm)

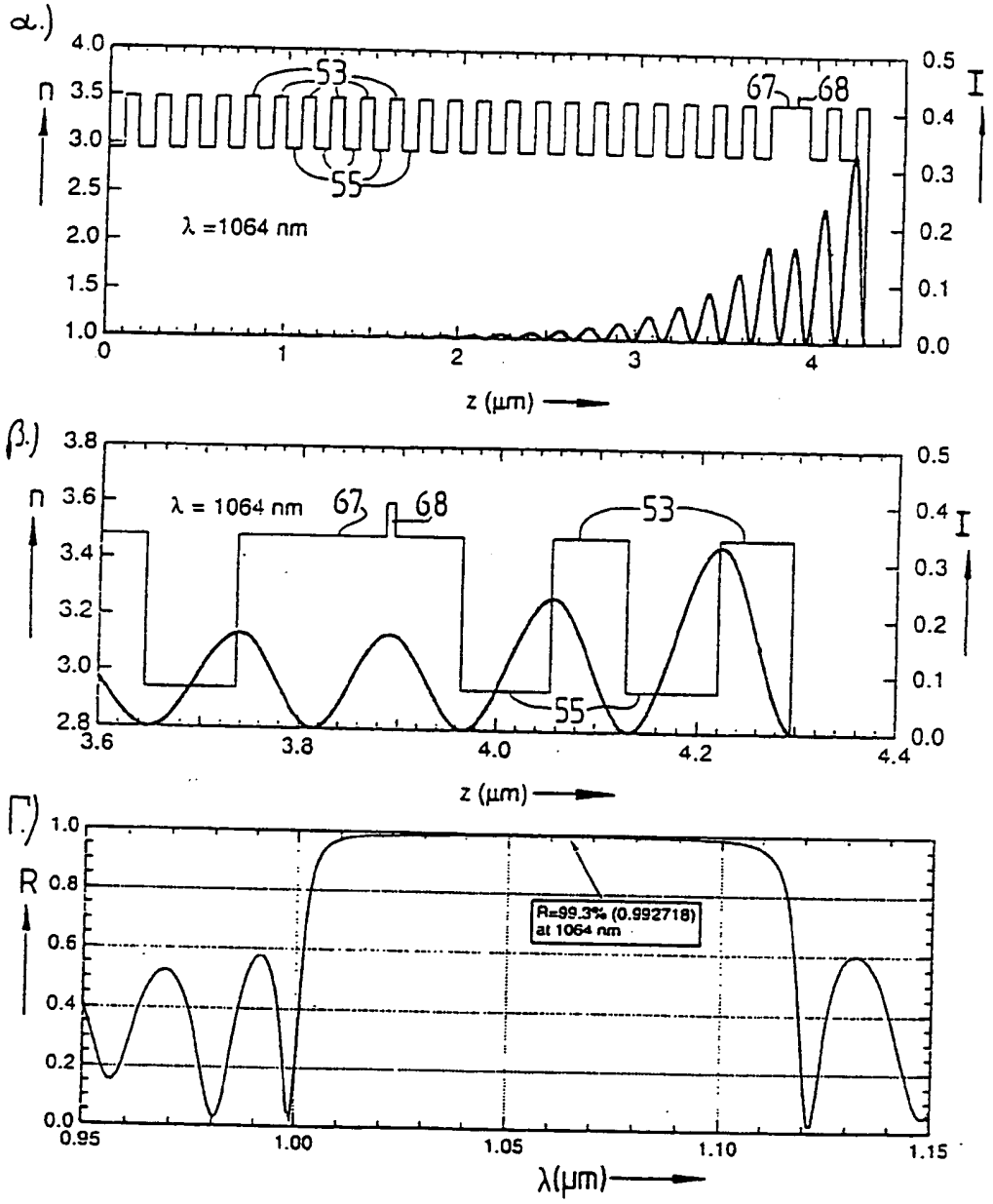

α.)
n
I
53
55
67
68
λ =1064 nm
z (µm)
β.)
λ = 1064 nm
γ.)
R
R=99.3% (0.992718)
at 1064 nm
λ(µm)

Fig. 8d

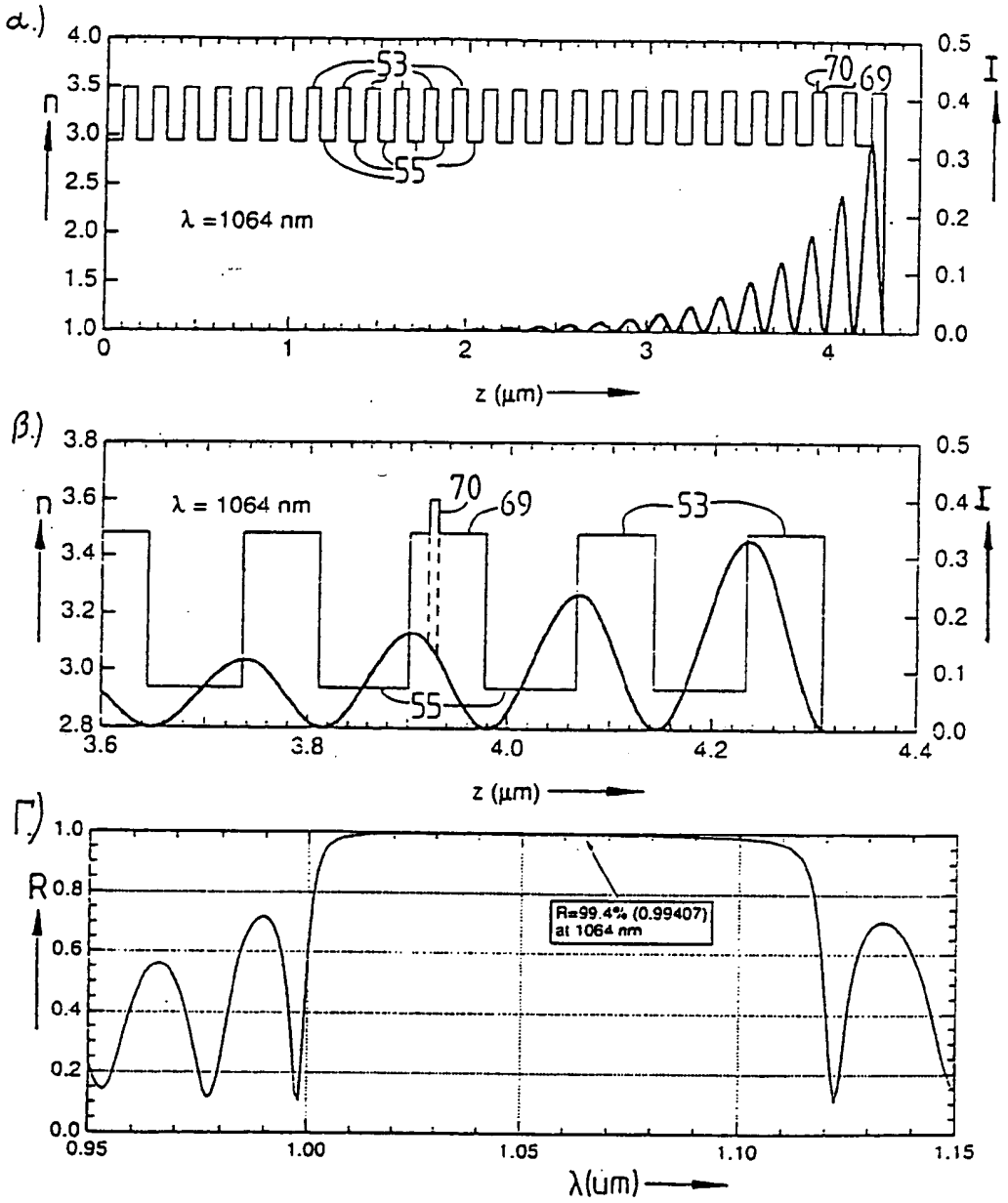

α.)
n
I
λ =1064 nm
53
55
70
69
z (μm)
β.)
λ = 1064 nm
Γ.)
R
R=99.4% (0.99407)
at 1064 nm
λ(um)

Fig. 8e

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/CH 96/00185

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
IPC 6 G02F1/35 H01S3/098

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 6 G02F H01S

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	APPLIED PHYSICS LETTERS, 20 MARCH 1989, USA, vol. 54, no. 12, ISSN 0003-6951, pages 1095-1097, XP002009823 KIM B G ET AL: "Nonlinear Bragg reflector based on saturable absorption" see the whole document	1-7,9,10
Y	---	8,11
X	JOURNAL OF OPTICS, MAY-JUNE 1990, FRANCE, vol. 21, no. 3, ISSN 0150-536X, pages 111-114, XP000575363 LE SAUX G ET AL: "Non-linear response of absorbing GaAs/GaAlAs Bragg reflectors" see the whole document	1-7,9,10
Y	---	8,11
	-/--	

[X] Further documents are listed in the continuation of box C.

[X] Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art.

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
1 August 1996	06. 09. 96

Name and mailing address of the ISA	Authorized officer
European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+ 31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl, Fax (+ 31-70) 340-3016	Maaswinkel, A

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (July 1992)

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/CH 96/00185

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US,A,5 265 107 (DELFYETT JR PETER J) 23 November 1993 see column 3, line 4 - line 53; figure 3	1-7,9,10
Y	see column 3, line 64 - column 4, line 9; figure 2	8,11
X	ELECTRONICS LETTERS, 16 FEB. 1995, UK, vol. 31, no. 4, ISSN 0013-5194, pages 287-289, XP002009825 BROVELLI L R ET AL: "Self-starting soliton modelocked Ti-sapphire laser using a thin semiconductor saturable absorber" cited in the application see figure 1	1-7,9,10
Y	see page 288, column 2, line 1 - line 2	8,11
Y	OPTICS LETTERS, 1 FEB. 1994, USA, vol. 19, no. 3, ISSN 0146-9592, pages 201-203, XP000424364 SZIPOCS R ET AL: "Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers" cited in the application see the whole document	8,11
X	EP,A,0 541 304 (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH) 12 May 1993 cited in the application see column 4, line 27 - column 6, line 6; figures 2-4	1-7,9,10
X	WO,A,85 03171 (AMERICAN TELEPHONE & TELEGRAPH) 18 July 1985 see page 9, line 20 - page 12, line 16; figures 6,7	1-7,10
X	OPTICS LETTERS, 15 DEC. 1992, USA, vol. 17, no. 24, ISSN 0146-9592, pages 1791-1793, XP000334839 JACOBOVITZ-VESELKA G R ET AL: "Broadband fast semiconductor saturable absorber" see the whole document	1-7,9,11

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No
PCT/CH 96/00185

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)		Publication date
US-A-5265107	23-11-93	NONE		
EP-A-0541304	12-05-93	US-A-	5237577	17-08-93
		DE-D-	69207862	07-03-96
		JP-A-	6067226	11-03-94
		US-A-	5345454	06-09-94
WO-A-8503171	18-07-85	CA-A-	1268847	08-05-90
		DE-A-	3474384	03-11-88
		EP-A-	0167547	15-01-86
		JP-T-	61500995	15-05-86
		US-A-	4860296	22-08-89